

Запропонована універсальна методика проектування промислового газопальникового обладнання на основі струменево-нішевої технології спалювання палива (СНТ). Представлено рекомендації щодо вибору основних геометричних параметрів паливо розподілу у пальникових пристроях (ПП) з можливістю спалювання природного та скрапленого паливних газів. Ціллю роботи є створення універсального ПП, який би задовольняв умовам широкої номенклатури існуючого вогнетехнічного обладнання (ВО)

Ключові слова: стабілізатор полум'я, пальниковий пристрій, «бідний» зрив полум'я, паливорозподіл, зріджений газ

Предложена универсальная методика проектирования промышленного газогорелочного оборудования на основе струйно-нишевой технологии сжигания топлива (СНТ). Предложено рекомендации по выбору геометрических параметров топливо распределения в горелочных устройствах (ГУ) с возможностью сжигания природного и сжиженного горючих газов. Целью работы является создание универсального горелочного устройства, которое бы удовлетворяло условиям широкой номенклатуры существующего огнетехнического оборудования (ОО)

Ключевые слова: стабилизатор пламени, горелочное устройство, «бедный» срыв пламени, топливоподача, сжиженный газ

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОГНЕТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

М. З. Абдулін

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: mزابdulin@gmail.com

О. А. Сірий

Кандидат технічних наук*

E-mail: Seruy_Alex@i.ua

А. М. Жученко

Кандидат економічних наук, головний інженер**

E-mail: nposnt@i.ua

О. М. Абдулін

Провідний інженер**

E-mail: abdulnam@rambler.ru

*Кафедра теплоенергетичних установок
теплових та атомних електростанцій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

**НВП «СНТ»

вул. Кирилівська, 102, м. Київ, Україна, 04080

1. Вступ

На використанні газу в якості основного енергоносія та найголовнішої хімічної сировини базується функціонування та розвиток таких найважливіших галузей промисловості як: енергетична, металургійна, хімічна, нафтопереробна, цементна, машинобудівна та інші. Великий відсоток газу споживається у комунальному господарстві [1].

Таке широке застосування природного газу в промисловості та енергетиці пояснюється його високими енергетичними та екологічними показниками у порівнянні з іншими видами органічного палива. Важливим аспектом в даному сенсі виступає простота його транспортування та розповсюдження. У зв'язку з розвитком енергоспоживання останнім часом активізується використання зрідженого природного газу [2]. В якості переваг використання газоподібного палива слід зазначити можливість автоматизувати складні вогнетехнічні процеси, підвищити культуру виробництва і створити високі санітарно-гігієнічні умови праці та знизити екологічне навантаження повітряного басейну.

Слід зазначити, що порушення технології спалювання органічного палива призводить до значного збільшення

хімічного і механічного недопалу, а також збільшення концентрації оксидів азоту, значення яких чітко регламентуються [3].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним з основних елементів паливовикористовуючого обладнання є пальниковий пристрій (ПП), робочі характеристики якого в значній мірі визначають ефективність, надійність та екологічність роботи агрегату [4].

Особливе місце серед відомих конструкцій пальників займають пристрої, які реалізують технологію спалювання на основі системі стабілізаторів полум'я. В якості стабілізаторів в таких пальниках використовуються погано обтічні тіла, наприклад у вигляді циліндра [5], перфорованої поверхні [6], кутника [7] або пластини [8].

Останнім часом досить ефективно застосовують методи комп'ютерного моделювання для дослідження особливостей процесу технічного горіння. В роботі [9] чітко встановлено вплив геометричних та режимних параметрів на ефективність горіння, меж стійкої фіксації полум'я, температурних полів за поганообтічним тілом.

Одним з основних параметрів, який визначає межі стійкого горіння палива в стабілізаторі є процес масообміну активного потоку пальної суміші із зоною циркуляції за стабілізаторами [10]. Однак у всіх приведених роботах дослідження стосуються лише взаємодії течії пальної суміші зі стабілізатором. Така схема на практиці має певні обмеження, особливо при застосуванні подібної конструкції на ВО, що працює за стехіометричних умов. Зазначені особливості можуть бути в значній мірі вирішені за допомогою організації взаємодії потоку окисника з перпендикулярною системою струменів пального, яка має ряд переваг у порівнянні зі стабілізацією погано обтічними тілами. Перша перевага забезпечується плавним регулюванням фізичних розмірів так званого «струменевого екрану». Друга – автономність процесів сумішоутворення в зоні зворотніх струмів, що виникає в затіненій зоні екрану і зони циркуляції на мінімальних швидкостях потоку суміші. За таким принципом працює струменево-нішева система (СНС), яка є більш ефективним засобом стабілізації факелу в порівнянні з різноманітними варіантами просто струменевої стабілізації або стабілізації погано обтічним тілом. СНС дозволяє регулювати робочий процес ПП в більш широкому діапазоні теплових навантажень [11].

Розміщення СНС на плоскому автономному колекторі-пілоні слугувало основою створення промислового газопальникового обладнання на основі СHT. В основу технології покладені такі принципи: раціональний розподіл палива в потоці окисника; стійка регульована аеродинамічна структура течії палива, окисника та продуктів згорання; саморегульованість складу пальної суміші в зоні стабілізації факелу [12]. Запропонована конструкція має наступні переваги у порівнянні з найпоширенішими реєстровими ПП із закруткою потоку окисника, це: значно нижчий аеродинамічний опір по трактам палива і окисника та збільшений коефіцієнт робочого регулювання навантаження [13]. В основу вказаної технології покладено роботи, проведені у КПП ім. Ігоря Сікорського.

Перспективність запропонованої конструкції підтверджено досить широким промисловим впровадженням технології. На сьогоднішній день на основі СHT проведено модернізацію значної кількості ВО України та зарубіжжя, до яких відносяться об'єкти енергетики, металургії, хімічної і легкої промисловості [13].

Протягом останнього часу проведено цикл робіт з вдосконалення робочих параметрів СHT. До найбільш значимих слід віднести роботи із розробки систем охолодження стабілізаторних пальників [14]. Отримано рекомендації стосовно конструктивного виконання систем самоохолодження пальників за рахунок підігріву окисника та пального.

Важливою вимогою надійної та ефективної роботи ВО є можливість підтримання номінального рівня температур у топковому просторі. При пуску слід запобігати термічного «удару» та температурної нерівномірності по об'єму. В більшій мірі організація робочого процесу ПП, які здебільшого працюють за принципом «закрутки» потоку палива та окисника не дозволяє проводити пуск обладнання за навантажень менших 20 % від номінального, що не сприяє рівномірності температурного поля робочого простору та призводить до руйнування термічно навантажених елементів ПП та ВО. У роботі [15] наведено методику розрахункової оцінки впливу локальної нерівномірності теплових потоків на пошкодження та

залишковий ресурс енергетичного обладнання. З огляду на отримані в роботі результати, відкритими залишаються питання переваги пристроїв даного типу в порівнянні з реєстровими пальниками.

Важливою є універсальність технології стосовно можливості використання декількох видів палива, оскільки на об'єктах малої енергетики, комунального або сільськогосподарства неодноразово виникають ситуації, які потребують резервування системи паливозабезпечення. Прикладом можуть слугувати непередбачені перебої у газопостачанні окремих населених пунктів де затримка енергозабезпечення може обернутися значними збитками. Досить часто виникає необхідність організації автономної роботи вогнетехнічного об'єкту (ВО) в умовах мобільних пересувних енергоустановок. В даному аспекті перспективним резервним паливом розглядається суміш зрідженого пропан-бутану. Привабливість його характеристик пояснюється наявністю у складі вуглеводнів, що зріджуються за мінімального тиску, а також відсутністю інертних газів як азот та діоксид вуглецю [16].

Аналіз робіт в досліджуваній області дозволяє визначити вектори розвитку СHT відповідно сучасному стану паливноенергетичного комплексу та можливостей галузі в цілому. Першим етапом розвитку визначається покращення регульовальних характеристик пальників з ціллю зниження технічного мінімуму навантаження модернізованого обладнання. Наступним кроком слід визначити можливості застосування газів різних за своєю теплотворною здатністю при модернізації ВО на основі СHT. В значній степені поставлені задачі можливо розв'язати за рахунок раціонального вибору параметрів паливорозподілу.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є визначенні способів підвищення ефективності роботи ВО в умовах змінних режимів його експлуатації за рахунок розширення меж сталої роботи пальників СHT та коефіцієнта робочого регулювання модернізованих об'єктів. Це дасть можливість знизити витрати палива на пускових режимах, а також адаптувати систему паливорозподілу пальникових пристроїв (ПП) до спалювання газів з різною стехіометрією і в цілому дозволить покращити рівень надійності ВО.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- дослідити межі стійкого горіння палива в робочому діапазоні зміни режимних та геометричних параметрів системи шляхом визначення «зривних» меж в області збідненої пальної суміші на етапах розпалу та згасання факелу;

- побудувати регресійні залежності для коефіцієнту надлишку повітря в системі (α) на режимах розпалу та згасання факелу в залежності від основних геометричних параметрів системи – діаметру газових отворів (d), відстані від зривної кромки ніші до газових отворів (L_1), а також відносного кроку розташування газових отворів ($\bar{S} = S/d$) на мінімальних пускових швидкостях потоку повітря, що набігає $W_n = 5$ м/с, та робочих швидкостях ($W_n = 15$ м/с) (рис. 2);

- дослідити отримані залежності на наявність максимуму та визначити діапазон рекомендованих значень для природного та зрідженого газів (використання зрідженої

пропан-бутанової суміші розглядається в якості резервного палива на діючому ВО);

– врахувати отримані результати в методиці проектування промислового газопальникового обладнання для широкого кола теплотехнічних задач, які в основному пов'язані з модернізацією існуючого вогнетехнічного обладнання.

4. Експериментальний стенд, пальні гази та методика проведення експерименту

4. 1. Опис експериментального стенду

Експериментальна частина досліджень виконувалась на спеціально обладнаному всією необхідною апаратурою вогневому стенді, схема якого приведена на рис. 1.

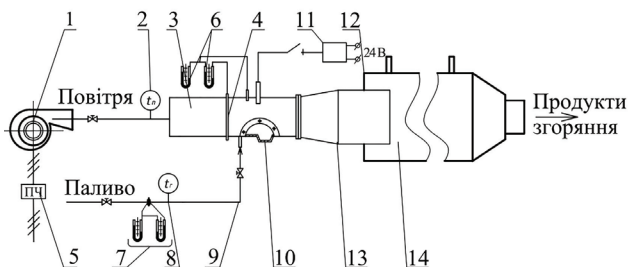


Рис. 1. Схема лабораторного вогневого стенду:

1 – вентилятор; 2 – термоелектричний перетворювач для вимірювання температури повітря; 3 – початкова ділянка; 4 – інтегральна трубка Піто; 5 – пристрій частотного регулювання обертів вентилятора; 6, 7 – блок манометрів; 8 – термоелектричний перетворювач для вимірювання температури палива; 9 – подача палива до основного колектора, розміщеного на струменево-нішевому модулі; 10 – струменево-нішевий модуль з оглядовим вікном; 11 – свіча запалювання; 12 – штуцери для відбору проб та вимірювання температури газів по довжині факелу; 13 – дифузор; 14 – футерована вогнева ділянка

Повітря на горіння подається в робочу ділянку вентилятором 1 з можливістю регулювання його витрати за рахунок зміни частоти обертання робочого колеса нагнітача частотним перетворювачем 5. Витрата вимірюється двома інтегруючими трубками Піто 4, що встановлені в повітряному каналі навхрест, сигнал від яких виводиться на лабораторні мікроманометри 6. Пальний газ подається до газового колектора 9, який розміщується безпосередньо в робочій зоні стабілізатора 10, його конструкція дозволяє проводити швидку заміну робочих модулів. Витрата палива вимірюється звукующим пристроєм, перепади тиску фіксуються чашковими мікроманометрами 10. Підпал горючої суміші виконується свічею запалювання 11. Продукти спалювання, а також пальна суміш, що не прореагувала, виводиться у димову трубу лабораторії. Місце стабілізації факелу 10 обладнане оглядовим віконцем, виконаним з кварцу, яке призначене для дослідження процесів запалювання/згасання факелу в стабілізаторі (рис. 2). Для визначення температур пального та окисника додатково використані термоелектричні перетворювачі опору (ТСМ) 2, 8. Для забезпечення допустимих температур найбільш теплонапружених елементів стабілізатору реалізовано його примусове повітряне охолодження.

Схема розміщення СНС на плоскому паливорозподільчому колекторі-пілоні приведена на рис. 2.

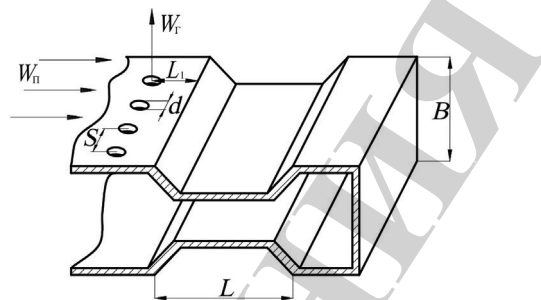


Рис. 2. Схема розміщення СНС на плоскому стабілізаторі:

W_n – швидкість повітря, W_r – швидкість палива, L_1 – відстань паливних отворів від зривної кромки ніші, S – крок розташування отворів, d – діаметри отворів, L – довжина нішевої порожнини, B – товщина стабілізатору

Методика експериментального дослідження являє собою багаторазове вимірювання витрат палива на режимах підпалювання та згасання факелу при встановленій швидкості потоку окисника. Вимірювання в кожній точці повторювались не менше чотирьох разів з подальшим статистичним аналізом результатів. Подальша інтерпретація результатів розглядалась як середнє арифметичне значення досліджуваного параметру з врахуванням промахів експерименту. Рівень значущості вимірювань – 95 %.

Обробка результатів експерименту являє собою використання методів математичного планування експерименту. Використаний підхід дозволяє одночасно вивчати вплив більшого числа факторів і поряд з кількісним урахуванням кожного окремого фактора встановити існування в системі міжфакторових взаємодій та оцінити ефекти останніх [17, 18].

4. 2. Теплофізичні характеристики досліджуваних паливних газів

Визначення сталості горіння у досліджуваній системі проводилось для природного газу та пропан-бутанової суміші, характеристики зазначених паливних газів приведено у табл. 1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики горючих газів

Властивість газу	Одиниця	Газ		
		Метан	Пропан	Бутан
Густина	кг/м ³	0,717	2,004	2,703
Межа поширення полум'я:				
– нижча C_H	об. %	5,0	2,2	1,9
– вища C_B	об. %	15,0	9,5	8,5
Температура запалення $t_{зап}$	°C	645–850	530–568	490–569
Нормальна швидкість розповсюдження полум'я $U_{нmax}$	см/с	29–33,8	39	37,9
Стехіометричний коефіцієнт:				
– L_V	м ³ /м ³	9,52	23,9	31,0
– L_O	кг/кг	17,23	15,7	15,46
Нижча теплота згорання Q_H^p	МДж/м ³	35,8	96,0	118,7
Температура горіння $T_{Гmax}$	°C	2040	2155	2118
Енергія запалювання, $Q_{зап}$	МДж	0,48	0,39	0,38

Зріджений газ являє собою суміш пропан-бутану у об'ємному співвідношенні 50/50 %, а природний газ на 98 % складається з метану.

Процес стабілізації факелу залежить від теплофізичних характеристик пального газу, основні з яких це: швидкість розповсюдження полум'я, концентраційні межі запалення та температура займання суміші. Сталість горіння, параметри факелу та емісійні показники об'єкту визначаються в першу чергу типом палива, а потім технічними особливостями ВО.

4. 3. Математичне планування експерименту

Побудова залежностей з врахуванням більше ніж 3 факторів виявилась практично не реалізованою. Тому для розв'язання поставлених в роботі задач було вирішено дослідити вплив тільки основних геометричних параметрів, при фіксованих режимних. Тому для визначення впливу геометричних характеристик паливорозподілу на межі сталого горіння виконано побудову центрального композиційного плану експерименту. Досліджувані параметри: діаметр газових отворів (d), відстань від зривної кромки ніші газових отворів (L_1), а також відносний крок розташування (S/d). Основою математичного планування в даному методі є проведення повнофакторного експерименту (ПФЕ), результатом якого є лінійні регресійні залежності, які не дозволяють отримати адекватне математичне описання досліджуваного явища зриву факелу. Тому для врахування окрім міжфакторних взаємодій доцільно додатково провести виміри у зіркових точках та центрі факторного простору для побудови квадратичних членів поліному. Основною ціллю планування є побудова математичної моделі залежності загального коефіцієнту надлишку повітря (параметр оптимізації) на пускових режимах від геометричних параметрів паливо розподілу в СНС. Результати отримані за пускової швидкості набігаючого потоку окисника $W_{\text{п}}=5$ м/с та робочій швидкості повітря $W_{\text{п}}=15$ м/с. Поверхня відгуку отримується з поліному другого ступеню $\alpha_{\text{пускове}} = f(d, L_1, S)$ для природного газу та пропан-бутанової суміші.

Основними рівнями факторів при побудові моделі прийняті наступні значення геометричних параметрів: $d=X_1=3$ мм, $L_1=X_2=17,5$ мм, $S/d=X_3=3,45$. По фактору X_1 прийнятий крок варіювання $\Delta X_1=1$ мм, по X_2 – $\Delta X_2=7,5$ мм, а по фактору X_3 – $\Delta X_3=1,15$ (табл. 2).

Таблиця 2

Умови проведення планування експерименту

Характеристика плану	Кодований масштаб x_i	Натуральний масштаб		
		$x_1=d$, мм	$x_2=L_1$, мм	$x_3=\bar{S}$
Нульовий рівень	0	3,0	17,5	3,45
Верхній рівень	+1	4,0	25	4,6
Нижній рівень	-1	2,0	10	2,3
Зіркові точки	+1,682	4,68	30,1	5,4
	-1,682	1,32	5,0	1,5

Координати зіркових точок та інші особливості побудови плану експерименту, отримання рівнянь регресії виконано за рекомендаціями [17].

Змінна X_1 – це кодована змінна значення діаметрів газоподавальних отворів, мм; X_2 – кодована змінна па-

раметра відстані газоподавальних отворів від зривної кромки нішевої порожнини, мм; X_3 – кодована змінна відносного кроку розташування отворів.

Значимість коефіцієнтів b_i визначалась з умови $|b_i| > S_{b_i} t$, де t – значення критерію Стюдента, а S_{b_i} – оцінки дисперсій при визначенні коефіцієнтів регресії. Перевірка адекватності отриманих регресійних рівнянь виконувалась за допомогою критерія Фішера. Результати оцінки адекватності наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Оцінка адекватності регресійних залежностей пускових характеристик газорозподілу в СНС

Паливо	Параметр	S_y^2	$S_{\text{ад}}^2$	F_p	$F_{\text{кр}}$
Природний газ	Запалювання, ($W_{\text{п}}=5$ м/с)	0,46	2,88	6,19	6,2
	Згасання, ($W_{\text{п}}=15$ м/с)	1,37	7,85	5,72	6,2
Зріджений газ	Запалювання, ($W_{\text{п}}=5$ м/с)	2,8	13,67	4,88	6,2
	Згасання, ($W_{\text{п}}=15$ м/с)	1,74	9,44	5,41	6,2

Перевірка відтворюваності досліджень виконувалась проведенням паралельних дослідів для всіх точок плану. В усіх досліджуваних умовах (паливо та геометрія паливорозподілу) для кожного параметру виконувалось порівняння розрахункового значення критерію Кохрена (G_p) з табличним (G). В усіх ситуаціях при довірчій вірогідності $P=0,95$ отримано $G_p < G$, тобто досліди слід вважати відтворюваними.

5. Результати дослідження процесу «зриву» факелу в СНС

На рис. 3 наведені результати експериментальних вимірювань меж підпалу та «бідного» згасання полум'я у стабілізаторі в залежності від відносного кроку розташування паливних отворів \bar{S} .

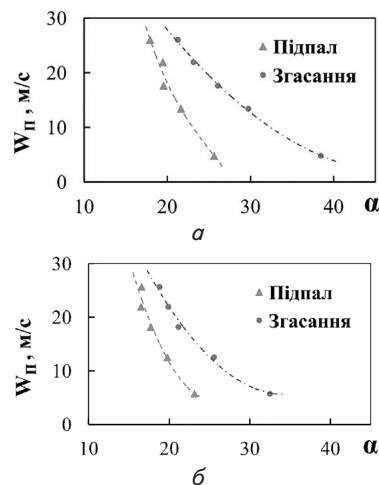


Рис. 3. Межі запалення та бідного зриву полум'я в СНС при $d=4$ мм, $L_1=15$ мм, паливо – природний газ: a – $\bar{S}=2,3$; b – $\bar{S}=4,6$

При аналізі наведених результатів слід звернути увагу на ту особливість, що збільшення відстані між газоподавальними отворами значним чином звужує межі сталого

горіння, що в основному проявляється на режимах згасання факелу. Для всіх отриманих результатів характерне розміщення межі підпалу знаходиться в зоні більш збагачених сумішей по відношенню до межі бідного згасання. У випадку $\bar{S} = 2,3$ найбільша різниця витрат для двох досліджуваних режимів знаходиться в зоні $W_{\text{п}} < 15$ м/с і становить 25...33 %. Для геометрії паливорозподілу з $\bar{S} = 4,6$ спостерігається якісно схожа картина, але з незначним зменшенням кількісних показників – збільшення витрати палива при пуску відбувається в середньому на 20 % в порівнянні з режимом згасання факелу у пальнику. Даний факт пояснюється в першу чергу об'ємом джерела ініціації займання. Під час запалення – це точкова іскра, яка розміщується в геометричному центрі нішевої порожнини. Під час загасання пальна суміш займається за рахунок чергового факелу, який обмежений стінками ніші і значно більший в об'ємі в порівнянні з іскрою свічі займання.

Стосовно впливу відносного кроку варто зазначити наступне. При збільшенні значення у 2 рази \bar{S} з 2,3 до 4,6 витрата палива на режимі пуску збільшується в середньому в усьому досліджуваному діапазоні значень швидкісного напору повітря на 10,2 %, а у режимі загасання – на 14,9 %. З точки зору надійності експлуатації вогнетехнічного обладнання на режимах пуску та в процесі максимально можливого зниження робочого навантаження ВО збільшення кроку \bar{S} погіршує коефіцієнт регулювання K_p стабілізатора відповідно на 15 %. Найбільше звуження меж сталого горіння спостерігається на максимальних (пускових) швидкостях окисника і становить майже 1/3 від сталого діапазону регулювання обладнання.

Варто підкреслити, що всі експериментальні результати для двох досліджуваних палив схожі якісно і відрізняються тільки своїми кількісними показниками.

З врахуванням додаткових точок факторного простору, що були визначені додатково до 9 точок ПФЕ, отримані співвідношення, за допомогою яких можна оцінити значення загального коефіцієнту надлишку повітря в СНС при бідному згасанні факелу в залежності від діаметрів газоподавальних отворів (1,3–4,7 мм), відстані від зривної кромки нішевої порожнини (5,0–30,0 мм), а також відносного кроку розміщення отворів (1,5–5,4).

Для оцінки впливу параметрів паливopодачі приведені результати планування експерименту для визначення функції відгуку для сумарного коефіцієнта надлишку повітря в системі на режимах бідного зриву полум'я і режимах запалювання факелу. Регресійні залежності зривних характеристик наведені нижче.

Природний газ, режим запалювання:

$$\alpha_{\Sigma} = 98,2 - 12,4d - 2,1L_1 - 17,1\bar{S} + 0,4L_1\bar{S} + 2,6d\bar{S} \quad (1)$$

Природний газ, режим згасання:

$$\alpha_{\Sigma} = 112,5 - 8,5d - 0,3L_1 - 30,8\bar{S} - 1,73d^2 - 0,04L_1^2 + 0,6S^2 + 0,4L_1\bar{S} + 4,7d\bar{S}. \quad (2)$$

Зріджений газ, режим запалювання:

$$\alpha_{\Sigma} = 21,7 - 0,7d - 0,6L_1 - 2,74\bar{S} + 1,1d^2 + 0,03L_1^2 + 0,73\bar{S}^2 - 0,05L_1\bar{S} + 4,7d\bar{S}. \quad (3)$$

Зріджений газ, режим згасання:

$$\alpha_{\Sigma} = 45,5 - 6,3d - 0,6L_1 - 4,6\bar{S} + 1,8d\bar{S}. \quad (4)$$

Попередній аналіз результатів шляхом оцінки коефіцієнтів при змінних в рівняннях (1) і (3) показує вплив геометричних параметрів на пускові якості системи із заданою геометрією, а вирази (2) і (4) – діапазон сталого горіння в системі.

Так, у всіх приведених виразах збільшення досліджуваних геометричних параметрів в більший або менший мірі знижує значення α_{Σ} , тим самим погіршуючи пускові якості стабілізатору (при цьому збільшується пускова витрата палива). При спалюванні природного газу найбільший вплив з досліджуваних параметрів створює зміна відносного кроку \bar{S} . По-перше, це пояснюється зміною концентрації палива в зоні нішевої порожнини, а по-друге – за рахунок впливу відносного кроку на гідродинаміку циркуляційної течії в нішевій порожнині.

При виборі оптимальних параметрів паливорозподілу доцільно провести взаємний аналіз всіх досліджуваних факторів за результатами планування (рис. 4).

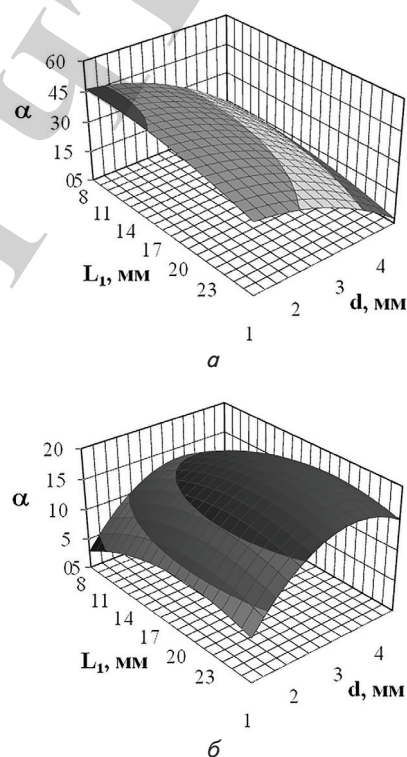


Рис. 4. Залежність загального коефіцієнта надлишку повітря від основних параметрів паливорозподілу на межі «бідного» зриву факела, висота повітряного каналу $H_k = 72$ мм: а – $\bar{S} = 2,3$; б – $\bar{S} = 4,6$; паливо – природний газ

За результатами досліджуваних процесів зриву у наведених умовах можна стверджувати про можливість покращення коефіцієнту регулювання системи у разі відповідного вибору досліджуваних параметрів. У діапазоні досліджуваних геометричних характеристик для природного газу найбільш прийнятною комбінацією є геометрія з найменшими значеннями параметрів (з урахуванням результатів замірів у зіркових точках). Стосовно ж пропан-бутанової суміші, то для покращення пуску слід обирати значення параметрів d та \bar{S} навпаки – в більшу сторону з діапазону досліджуваних значень, у зв'язку із його значно більшою калорійністю та значною відмінністю

теплофізичних характеристик. Проведення максимізації отриманих залежностей (1)–(4) дозволить отримати області оптимальних значень параметрів паливо розподілу, які можуть бути використані при проектуванні універсальних ПП на основі СНТ. Отримані результати приведені в табл. 4.

Таблиця 4
Області оптимальних значень параметрів паливорозподілу ПП СНТ

Параметр паливорозподілу	Позначення параметру	Область оптимальних значень для природного газу	Область оптимальних значень для зрідженого газу
Діаметр отворів	d	1,3...2,0 мм	4,5...5,0 мм
Крок розташування	\bar{S}	1,5...1,7	4,3...4,8
Відстань від ніші	L_1	5,0...7,0 мм	5,0...7,0 мм

Результати показали однозначну залежність між «пусковими» характеристиками та «зривними» якостями системи, тому в подальшому аналізі до уваги обрано режим згасання. Також важливо зазначити той факт, що використання зрідженого газу на пальниках на природному газі потребує корекції системи паливо розподілу. Це пояснюється неможливістю забезпечення стехіометричної концентрації палива в об'ємі суміші в області стабілізації факелу при застосуванні геометрії паливоподачі для природного газу. Фактично, покращення пускових режимів для більш калорійного палива потребує менших концентрацій газу, що досягається принаймні збільшенням кроком газоподавальних отворів в порівнянні з газоподачею пальників на природному газі.

З результатів розв'язання оптимізаційної задачі визначено, що комбінацією факторів для природного газу є геометрія паливоподачі з найменшими значеннями параметрів в досліджуваному діапазоні: $d=1,3$ мм, $L=5$ мм, $\bar{S}=1,5$. Що ж стосується пропан-бутанової суміші, то збільшення кроку та відстані L_1 покращує пуск пальника на пропані за рахунок наближення до стехіометричної концентрації палива в зоні стабілізації полум'я.

Як видно на рис. 5, для зрідженого газу за відносного кроку $\bar{S}=4,6$ при застосуванні більших діаметрів доцільно змінити значення відстані L_1 в більшу сторону (10...30 мм), що ілюструється зростанням характеристики зриву (пунктирна лінія рис. 5, а, б). Для менших значень діаметрів ($d < 3,0$ мм) відстань L_1 впливає несуттєво.

При проектуванні ПП користуються принципом модульності пальників, коли в якості самостійної паливної комірки розглядається одиничний пілон полум'я, робочі характеристики якого в повній мірі визначають основні характеристики пальників. Теплова потужність пристрою «набирається» відповідною кількістю одиничних модулів і являє собою рівномірну решітку стабілізаторів полум'я. Довжина стабілізаторів обирається у відповідності до конструктивних особливостей об'єкту, а повітропровід з пілонами повинен бути розміщений в існуючому отворі «амбразури», де розміщувався штатний пальник. Таким чином, при проектуванні пальників першим геометричним параметром паливоподачі слід обирати значення діаметру паливних отворів, який визначається відповідно до технологічних умов ВО (табл. 5).

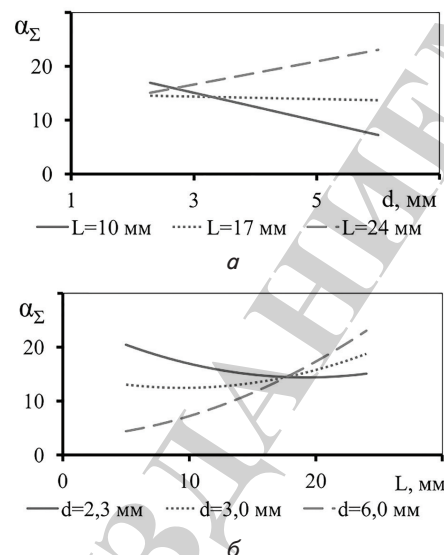


Рис. 5. Характеристика бідного зриву факелу для зрідженого газу при $\bar{S}=4,6$: а – залежність від діаметру, б – залежність від параметру відстані L_1

Таблиця 5
Основні рекомендації стосовно вибору геометричних параметрів паливо розподілу, паливо природний газ

d , мм	Потужність, Гкал	Застосування
0,5–2	Без обмежень	Камери згоряння ГТУ
2–4	До 15	Котли, печі, сушарки
4–6,5	15...100	Котли

Стосовно вибору кроку слід зазначити, що він має враховувати, по перше, гідродинаміку взаємодії струмин палива з потоком повітря, а по друге – забезпечити відповідну концентрацію суміші в зоні стабілізації, тому робочі значення кроків для двох розглянутих газів знаходяться в межах 3,0...6,0. Значення параметру L_1 дозволяють регулювати ступінь перемішування палива, тому рекомендується обирати більші значення при більших діаметрах в рекомендованому діапазоні (2 квадрант діаграми) (рис. 6).

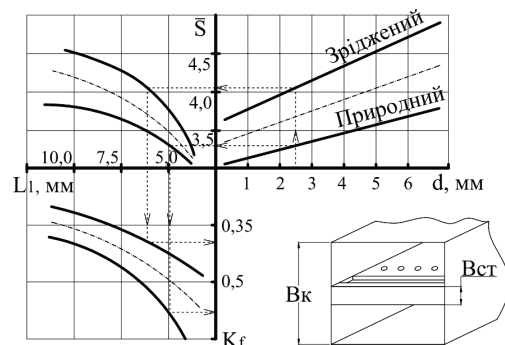


Рис. 6. Номограма для розрахунку пальникового пристрою СНТ, паливо - природний газ, повітряний канал квадратного перетину, коефіцієнт загромождження $K_f = B_{ст}/B_k$, вибір L_1 за шкалою для природного газу

Параметр відносного захащення повітряного каналу стабілізаторами K_f при виборі для більших діаметрів

зміщений у сторону зменшення можливого діапазону варіювання, для забезпечення необхідної витрати повітря. Його вибір засновується на стехіометричному співвідношенні газ/повітря. Рекомендації щодо вибору K_f наведені у методиці розрахунку промислового газопальникового обладнання [20].

6. Обговорення результатів дослідження та рекомендації щодо вибору параметрів паливорозподілу пальників

Як видно з наведених матеріалів, універсальність прийнятої конструкції щодо компоновки пальників може бути підтверджена також при переході з природного газу на спалювання альтернативних палив. Для забезпечення сталості горіння палива слід враховувати особливості гідродинаміки потоку палива і окисника в системі. Як показали дослідження, забезпечення сталості горіння для двох різних палив може бути досягнуто спільною геометрією паливорозподілу.

Певним чином інтерпретуються отримані результати оптимізації в методиці проектування ПП. Необхідне зміщення від оптимальної області відносного кроку отворів \bar{S} , пов'язане з особливостями організації гідродинамічної структури потоку, оскільки вона в досліджуваних пристроях відіграє визначальну роль. Так, робочий відносний крок для природного газу становить $\bar{S} = 2,0 \dots 4,0$, а стехіометричний коефіцієнт дорівнює 9,5, що приблизно у 3 рази менше у порівнянні зі зрідженим газом. На перший погляд логічне коригування \bar{S} для зрідженого газу до значень 6...12 виявляється цілком невірним заходом, а максимальне робоче значення становитиме не більше $\bar{S} = 6,0$. Пояснюється це особливостями поведінки системи струмин у потоці окисника, що набігає. Так, за відносного кроку $\bar{S} > 6,0$ струмені палива розповсюджуються в потоці самостійно без взаємодії пограничних шарів, що порушує спільну вихорову структуру пальної суміші, погіршуючи процес стабілізації факелу. Аналогічні висновки можна інтерпретувати до менш калорійних газів, стехіометричне співвідношення яких наближається до значень 1:1...4,0 (паливо:повітря). А конкретно – зменшення відносного кроку до значень $\bar{S} < 2,0$ призводить до злиття струменів палива, які утворюють по суті єдиний щільний струмінь. Така картина також унеможливає якісне сумішоутворення на режимах максимальних витрат через погіршення проникнення палива у потік окисника. Тому робочими незалежно від спалюваного газу є значення параметру $\bar{S} = 2,0 \dots 6,0$ який сприяє утворенню стійкої вихорової структури в широкому діапазоні зміни швидкостей палива та окисника. Забезпечення стехіометричного співвідношення на пальнику досягається варіюванням захарачення повітряного каналу стабілізаторами K_f .

Вплив діаметру та параметру відстані слід розглядати спільно. Збільшення діаметру призводить до збільшення глибини проникнення струменя у потік окисника і визначає допустимі межі захарачення каналу стабілізаторами. Параметр відстані L_1 дозволяє регулювати механізм горіння і при збільшенні відстані від зривної кромки змінює дифузійний факел у сторону кінетичного. При застосуванні збільшених діаметрів (5...7,0 мм) доцільно віддаляти струмені у глибокий канал. Такий захід дозволяє змістити дифузійність процесу у сторону мікродифузійного горіння палива, що є необхідною умовою організації

стійкого горіння з достатньо високою тепло напруженістю робочого об'єму.

Приведені результати є важливим кроком стосовно визначення перспектив застосування вже зарекомендованої конструкції ПП, яка працює на природному газі. Надані рекомендації надають можливість адаптувати ПП до спалювання обох досліджуваних газів і значно підвищити надійність експлуатації ВО, за рахунок резервування природного газу зрідженою сумішшю пропан-бутану.

Основним недоліком отриманих результатів є обмеженість у плані експерименту кількості досліджуваних впливових факторів. Така ситуація не дозволила визначити вплив швидкості потоку повітря, що набігає, або комплексно дослідити глибину вигорання палива і провести газовий аналіз разом із пусковими характеристиками. До того ж є певна неузгодженість результатів оптимізації стосовно покращення пуску з робочими режимами на номінальних витратах.

Очевидним є той факт, що наступним етапом досліджень має бути вибір конструкції стабілізатору пальника, який би дозволяв використовувати гази з калорійністю 1–4 Ккал/м³. З огляду на отримані результати, можна зробити припущення, що корекцією тільки паливо розподілу вирішити у повній мірі поставлену задачу не вдасться. У цьому випадку додатково необхідно оптимізувати окрім геометричних параметрів пальника ще й режимні.

Подальшим розвитком дослідження слід зазначити пошук можливості спалювання окрім досліджених газів ще й рідкого палива (дизель, мазут). Реалізація даної вимоги потребує ускладнення конструкції паливорозподілу та значної кількості дослідних експериментів з подальшою апробацією на реальному об'єкті.

7. Висновки

1. Дослідження режиму «пуску» та «зриву» факелу в СНС показало, що пускові витрати палива в 1,05...2,5 рази більші і визначаються геометричними та режимними параметрами системи. На швидкості повітря $W_n > 20$ м/с ця різниця мінімізується, а при $W_n < 10$ м/с – досягає максимальних значень. Визначено, що для природного газу $G_{\text{зал}}/G_{\text{згас}}$ на 5...15 % менше в порівнянні з цим показником для зрідженого газу. Таким чином, для забезпечення надійності й безпечності пуску обладнання рекомендовано проводити підпал горючої суміші у пальнику за мінімальної швидкості повітря. Для забезпечення максимальної глибини розвантаження агрегату рекомендовано обирати параметри стабілізатора у відповідності до приведених рекомендацій.

2. Визначено, що використання повнофакторового експерименту (ПФЕ) для побудови регресійних рівнянь, які б адекватно описували процес зриву факелу у досліджуваній системі, недостатньо, очевидно в результаті нелінійності досліджуваного процесу. Тому побудова регресійних залежностей обмежена тільки трьома впливовими факторами і додатково до 8 точок плану експерименту обрано ще результати дослідження у зіркових точках та центрі факторного простору. Це в сукупності дозволяє побудувати центральний ортогональний композиційний план другого порядку і в кінцевому результаті отримати адекватну математичну модель досліджуваного явища.

3. Визначено оптимальні параметри паливо розподілу для пальників на основі СНС. Встановлено визначальний

вплив на робочий процес ПП відносного кроку \bar{S} – рекомендовані значення для двопаливного пристрою складають 3...4,5. Вибір відстані L_1 слід проводити якомога ближче до зривної кромки ніші незалежно від умов, що реалізується в межах значень 5...10 мм. Робочі діапазони значень діаметрів паливорозповсюджуючих отворів знаходяться в межах 1,0...7,0 мм і обираються згідно до технологічних умов ВО.

4. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо вдосконалення методики проектування газопальникового обладнання СНТ для широкого кола ВО.

Отримані результати дозволили розробити основи проектування двопаливного ПП з можливістю використання природного та скрапленого газів. Досягнуті показники стосовно розширення діапазону регулювання на рівні 5...100 % від номіналу позитивно відрізняють досліджувану технологію від сучасних аналогів. Низький тиск палива для запуску (до 1 мм вод. ст.) дозволяє забезпечити мінімальні витрати палива, що забезпечує «м'який» температурний режим та відсутність вибухонебезпечної загазованості топкового простору.

Література

1. Faramawy S., Zaki T., Sakr A. A.-E. Natural gas origin, composition, and processing: A review // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 34. P. 34–54. doi: 10.1016/j.jngse.2016.06.030
2. Xiong X., Lin W., Gu A. Design and optimization of offshore natural gas liquefaction processes adopting PLNG (pressurized liquefied natural gas) technology // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 30. P. 379–387. doi: 10.1016/j.jngse.2016.02.046
3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council. Access to European Union law, 2010. 119 p.
4. Industrial Burners Handbook / C. E. Baukal (Ed.). CRC Press, 2003. 808 p. doi: 10.1201/9780203488805
5. Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames / Ahmed S. F., Balachandran R., Marchione T., Mastorakos E. // *Combustion and Flame*. 2007. Vol. 151, Issue 1-2. P. 366–385. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.06.012
6. Kedia K. S., Ghoniem A. F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate // *Combustion and Flame*. 2012. Vol. 159, Issue 3. P. 1055–1069. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.10.014
7. Lin C.-X., Holder R. J. Reacting Turbulent Flow and Thermal Field in a Channel With Inclined Bluff Body Flame Holders // *Journal of Heat Transfer*. 2010. Vol. 132, Issue 9. P. 091203. doi: 10.1115/1.4001627
8. Guo P., Zang S., Ge B. Technical Brief: Predictions of Flow Field for Circular-Disk Bluff-Body Stabilized Flame Investigated by Large Eddy Simulation and Experiments // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2010. Vol. 132, Issue 5. P. 054503. doi: 10.1115/1.3205029
9. E J., Huang H., Zhao X. Numerical investigations on effects of bluff body in flat plate micro thermo photovoltaic combustor with sudden expansion // *Journal of Central South University*. 2016. Vol. 23, Issue 4. P. 975–982. doi: 10.1007/s11771-016-3145-6
10. Lefebvre A. H., Ibrahim A. R. A. F., Benson N. C. Factors affecting fresh mixture entrainment in bluff-body stabilized flames // *Combustion and Flame*. 1966. Vol. 10, Issue 3. P. 231–239. doi: 10.1016/0010-2180(66)90079-4
11. Abdulin M. Z., Siryi O. A. Research of hydrodynamic flame stabilizer with cross fuel feed characteristics // *Riga Technical University*. 2014. Issue 15. P. 12–18.
12. Абдулін М. З., Джамал І. Тепловий режим мікродифузійного газогорілочного пристрою // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 1997. С. 111–113.
13. Струйно-нишевая технология сжигания топлива – основа надежной работы огнетехнического оборудования / Абдулин М. З., Дворцин Г. Р., Жученко А. М. и др. // Третья Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность крупного промышленного региона». Донецк, 2008. С. 18–24.
14. Performance analysis of cooling stabilizing burners for different stress boiler unit / Fialko N. M., Prokopov V. H., Alyosha S. A., Sherenkovskyy Y. et. al. // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Теорія і практика будівництва. 2013. № 756. С. 43–46.
15. Analysis of residual operational resource of high-temperature elements in power and industrial equipment / Chernousenko O., Butovsky L., Rindyuk D., Granovska O., Moroz O. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, Issue 8 (85). P. 20–26. doi: 10.15587/1729-4061.2017.92459
16. Осипова Н. Н. Выбор оптимальных параметров поселковых систем газоснабжения на базе резервуарных установок с искусственным испарением сжиженного углеводородного газа // *Вестник СГТУ*. 2010. С. 182–186.
17. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 279 с.
18. Статистическая обработка результатов активного эксперимента / Гартман Т. Н., Васильев В. В., Петрищев С. Д. и др. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2006. 52 с.
19. Абомелик Т. П. Метрология планирования эксперимента. Сборник лабораторных работ. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 36 с.
20. Иванов Ю. В. Газогорелочные устройства. М.: Недра, 1972. 276 с.